

## Силабус

### по вивченню дисципліни «Одержання матеріалів при високих тисках» для аспірантів, спеціальність 132 «Матеріалознавство»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту надтвердих  
матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН  
України,  
академік НАН України



В.З. Туркевич  
«20» січня 2021 р.

#### 1. Викладачі

**Івахненко Сергій Олексійович, член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор.**

Контактний телефон: (044) 463-99-51; sioz@ismv13.kiev.ua

*Наукові інтереси:* Дослідження закономірностей вирощування структурно досконалих великорозмірних монокристалів алмазу і кубічного нітриду бору та створенням наукових основ і нових технологій їх отримання при надвисоких тисках і температурах; фазові перетворення в речовинах при високому тиску і температурах, кристалізація алмазу та кубічного нітриду бору з нанесеним дефектно-домішковим складом в області термодинамічної стабільності, а також вивчення властивостей зазначених матеріалів.

**Бочечка Олександр Олександрович, д.т.н., старший науковий співробітник.**

Контактний телефон: (044) 379-14-47; bochchka@ism.kiev.ua

*Наукові інтереси:* Дослідження фізико-хімічних процесів в твердій фазі і розплавах, вивчення взаємодії надтвердих речовин з газами і рідким середовищем при формуванні в широкому діапазоні температур і тисків монокристалічних, полікристалічних, дисперсних, плівкових надтвердих матеріалів і композитів на їх основі. Вивчення структури і властивостей синтезованих матеріалів. Фізичні дослідження кристалів сучасними методами.

**Боримський Олександр Іванович, к.т.н, старший науковий співробітник.**

Контактний телефон: (044) 468-89-87; BorimskiyAI1940@nas.gov.ua

*Наукові інтереси:* Дослідження та розробка конструкцій апаратів високого тиску різних типів, пресового обладнання різних типів, пресового обладнання для синтезу надтвердих матеріалів і технологій синтезу алмазу і кубічного нітриду бору, дослідження впливу  $p$ ,  $T$ -обробки на властивості і структуру матеріалів.

**Лещук Олександр Олександрович, д.т.н., старший науковий співробітник.**

Контактний телефон: (044) 379-11-02; leshchuk@ism.kiev.ua

**Наукові інтереси:** Фізико-механічні дослідження матеріалів, їх неруйнівний контроль, нанотестування з урахуванням структурних особливостей і надвисокого тиску; комп'ютерне моделювання силових і теплових полів, оптимізація багатоелементних апаратів високого тиску, вдосконалення технологій отримання матеріалів і виробів, комп'ютерні розрахунки з механіки матеріалів і виробів.

**2. Назва, код дисципліни та кількість кредитів.**

«Одержання матеріалів при високих тисках» спеціальність 132 «Матеріалознавство», код: 132, кількість кредитів – 5.

**3. Місце проведення навчальної дисципліни та час.**

ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України; відповідно до розкладу.

Розділ дисципліни, викладач	Час проведення лекції (корп. 2, кімн. 301)	
	1 курс (модуль 1)	2 курс (модуль 2)
Кристалізація алмазу та кубічного нітриду бору з рас плавів при високих тисках. Івахненко С.О.		22.02.21 – 11-00 15.03.21 – 11-00 29.03.21 – 11-00 17.05.21 – 11-00 02.06.21 – 11-00
Спінання порошків надтвердих матеріалів під дією високого тиску. Бочечка О.О.		08.02.21 – 11-00 21.04.21 – 9-00 02.06.21 – 9-00
Апарати високого тиску для синтезу і спінання надтвердих матеріалів. Борімський О.О.		22.02.21 – 9-00 21.04.21 – 11-00 14.06.21 – 9-00
Моделювання термомеханічного стану елементів апаратів високого тиску. Лещук О.О.		15.02.21 – 9-00 15.03.21 – 9-00 29.03.21 – 9-00 15.05.21 – 11-00 23.06.21 – 9-00

**4. Пререквізити навчальної дисципліни:** мати базові знання у галузі матеріалознавство і технологія сучасних і перспективних матеріалів, основні напрямки розвитку матеріалознавства, отримання матеріалів при високих тисках і температурах; знати основні закономірності процесів кристалізації і структуроутворення матеріалів, основи їх термообробки; класифікацію і способи отримання композиційних матеріалів; принципи вибору конструкційних матеріалів для застосування у виробництві; будову і властивості надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору та алмазу, методи їх дослідження; класифікацію матеріалів, металів і сплавів, їх області застосування; основи теорії різання матеріалів та області

застосування різальних інструментів із надтвердих матеріалів; основні розділи фізики, термодинаміки, хімії та математики.

**Постреквізити:** в результаті вивчення дисципліни будуть отримані навички ефективного застосовування базових математичних та природничо-наукових знань в професійній діяльності; здатність аналізувати науково-технічну інформацію, виконувати чисельні та експериментальні дослідження; здатність і готовність використовувати інформаційні технології, використовувати комп'ютер як засіб роботи з інформацією і створення нової інформації; володіти навичками збору даних, вивчення, аналізу та узагальнення науково технічної інформації по тематиці дослідження; володіти навичками використання технічних засобів для вимірювання і контролю основних параметрів технологічних процесів, властивостей матеріалів і виробів з них; особливості технологічних підходів до створення високих тисків в зоні оброблення речовини, обладнання високих тисків, особливостей впливу високих тисків на структуру і властивості отриманих матеріалів; аналізувати і вибирати обладнання для створення високих тисків відповідно до заданих умов, визначати наслідки впливу високих тисків на отримані матеріали; читати та оформляти технічну документацію; використовувати отримані знання при виконанні дослідження та захисті її результатів у вигляді дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії.

#### 5. Вимоги навчальної дисципліни.

Вивчення курсу «Одержання матеріалів при високих тисках» являється обов'язковим. Об'єм навчального навантаження складає 5 кредитів із них 60 годин – лекції, 90 години – самостійна робота. Вивчення наукової дисципліни вимагає обов'язкове відвідування аудиторних занять, активну участь в обговоренні питань, якісне і своєчасне виконання завдань самостійної роботи, а також участь у всіх видах контролю.

#### 6. Характеристика дисципліни.

*Завдання учбової дисципліни.* освоїти сучасні уявлення щодо впливу високих тисків речовину, створення матеріалів з використанням високих тисків.

*Мета викладання дисципліни* – опанування новітніми знаннями щодо створення сучасних матеріалів, у тому числі надтвердих, з використанням високих тисків, обладнання високих тисків, підходів до моделювання явищ в апаратах високого тиску.

*План викладання дисципліни:*

Назва змістовних модулів і тем	Кількість годин		
	усього	у тому числі	
		аудиторні	само- стійна робота
<b>Модуль 1</b>			
<b>Змістовний модуль 1. Кристалізація алмазу та кубічного нітриду бору з розплавів при високих тисках</b>			

<p><b>Тема 1.</b> Вибір технологічних методів одержання монокристалів алмазу (Івахненко С.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вирощування кристалів різних речовин з розчинів, розплавів та газової фази;</li> <li>– типи кристалізаційних установок для використання методів змінення температури, гідротермальної кристалізації, зонної плавки – горизонтальної направленої кристалізації;</li> <li>– витягування кристалів;</li> <li>– апаратура високих тисків:</li> <li>- ковадла Бріджмена та Дрикамера, ковадла з заглибленням та «тороїд»;</li> <li>- апарати «белт» та «герлд»;</li> <li>- багатопуансонні апарати типу «БАРС»,</li> <li>- шестипуансонний трьохвісного стиснення.</li> </ul>	5	2	3
<p><b>Тема 2.</b> Вирощування монокристалів алмазу на затравці (Івахненко С.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– спонтанна кристалізація;</li> <li>– фактори, що впливають на утворення зародків кристалізації;</li> <li>– гетерофазне зародкоутворення;</li> <li>– використання затравок для ініціації росту кристалів;</li> <li>– метод температурного градієнта Стронга-Венторфа для вирощування структурно досконалих монокристалів алмазу;</li> <li>– методи змінення розподілу температури та величин температурних градієнтів;</li> <li>– епітаксійний та автоепітаксійний ріст кристалів.</li> </ul>	5	2	3
<p><b>Тема 3.</b> Діаграми стану подвійних та потрійних систем на основі Fe, Al, Co, Mg та їх використання для кристалізації алмазу. Вплив високих тисків до 8 ГПа на фазові рівноваги (Івахненко С.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вплив високих тисків на температуру плавлення елементів та їх фазові діаграми;</li> <li>– фазова діаграма вуглецю; фазова рівновага графіт -алмаз: розрахунки та експериментальне визначення;</li> <li>– t-c-p-діаграми сплавів Fe-C, Ni-C, Fe-Ni-C, Mg-C, Fe-Co, Fe-Al;</li> <li>– особливості будови діаграм стану для використання сплавів у якості розчинників.</li> </ul>	5	2	3

<p><b>Тема 4.</b> Класифікація типів алмазів. Типи дефектів у кристалічній структурі алмазу. Габітусні типи алмазу та вплив температур вирощування на них (Івахненко С.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– дефектно-домішковий склад природних та вирощених алмазів;</li> <li>– точкові, лінійні та об'ємні дефекти кристалічної структури алмазу;</li> <li>– фактори, що впливають на зовнішній вигляд кристалів;</li> <li>– скелетні та антискелетні форми кристалів, дендрити;</li> <li>– ретикулярні щільності, правило Кюри-Вульфа найбільшого розвитку граней.</li> </ul>	5	2	3
<p><b>Тема 5.</b> Методи вивчення дефектно-домішкового та фазового складу монокристалів та матеріалів (Івахненко С.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– рентгеноструктурний аналіз;</li> <li>– рентгеноспектральний аналіз;</li> <li>– ІЧ-спектроскопія;</li> <li>– інші оптичні методи аналізу розподілу домішок та зонально-секторіальної будови.</li> </ul>	5	2	3
<p><b>Змістовний модуль 2. Спінання порошків надтвердих матеріалів під дією високого тиску</b></p>			
<p><b>Тема 6, 7.</b> Спінання мікропорошків (Бочечка О.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– утворення полікристалів;</li> <li>– основи теорії спінання;</li> <li>– <math>p, T</math>-діаграма спінання алмазу;</li> <li>– апарат високого тиску типу «тороїд» для спінання порошків надтвердих матеріалів;</li> <li>– зміна властивостей матеріалів комірки АВТ під час спінання порошків алмазу;</li> <li>– дія тиску на алмазні порошки за кімнатної температури;</li> <li>– кінетика ущільнення алмазного порошку за різних температур під дією високого тиску;</li> <li>– особливості структурного стану полікристалічного алмазу, отриманого у високотемпературній області спінання.</li> </ul>	10	4	6
<p><b>Тема 8.</b> Спінання нанопорошків (Бочечка О.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– особливості формування полікристалів під час спінання за високого тиску алмазних порошків різної дисперсності;</li> <li>– аналіз рушійних сил процесу спінання</li> </ul>	5	2	3

алмазних порошків мікро- і нанодіапазонів за високого тиску; – спікання алмазних нанопорошків детонаційного синтезу під дією високого тиску і високої температури.			
<b>Змістовний модуль 3. Апарати високого тиску для синтезу і спікання надтвердих матеріалів</b>			
<b>Тема 9.</b> Історія розвитку і основоположники створення техніки високих твердофазових тисків і високої температури (Боримський О.І.): – визначення тиску, як фізичної величини; – одиниці виміру тиску; – класифікація високих тисків; – вплив високого тиску і високої температури на фазові перетворення, фізичні і хімічні властивості речовин; – фазові діаграми вуглецю і нітриду бору; – роботи Лейпунського О. І. по синтезу алмаза; – матеріали-репери для визначення високого тиску в апаратах високого тиску (АВТ).	5	2	3
<b>Тема 10.</b> Ознайомлення з технікою високого тиску, яка використовується для синтезу і спікання надтвердих матеріалів у ІНМ (Боримський О.І.): – АВТ та пресове обладнання зусиллям від 6,3 до 50 МН; – допоміжне технологічне обладнання для виготовлення елементів реакційних комірок АВТ.	5	2	3
<b>Тема 11.</b> Обладнання одновісного стискання для створення високого тиску і високої температури, у тому числі для синтезу і спікання НТМ та дослідження при тиску в мегабарному діапазоні (Боримський О.І.): – класифікація; – особливості конструкції; – технічні характеристики.	5	2	3
<b>Змістовний модуль 4. Моделювання термомеханічного стану елементів апаратів високого тиску</b>			
<b>Тема 12.</b> Комп'ютерне проектування та оптимізація в технологіях термобаричної обробки матеріалів (огляд) (Лещук О.О.).	5	2	3
<b>Тема 13.</b> Моделювання теплових процесів	5	2	3

<p>(Лещук О.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– математична модель процесу резистивного нагрівання АВТ;</li> <li>– провідні властивості матеріалів елементів АВТ;</li> <li>– моделювання провідних процесів методом скінченних елементів.</li> </ul>			
<p><b>Тема 14.</b> Моделювання деформаційних процесів (Лещук О.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– напруження і деформації;</li> <li>– рівняння пластичної течії для моделі ізотропного термопружнопластичного матеріалу з урахуванням кінцевих пружних, пластичних та фазових деформацій;</li> <li>– моделювання деформаційних процесів методом скінченних елементів.</li> </ul>	5	2	3
<p><b>Тема 15.</b> Моделювання фазових переходів при високих тисках і температурах (Лещук О.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– мультифізичні процеси в АВТ при синтезі і спіканні надтвердих матеріалів;</li> <li>– дворівнева термомеханічна модель спонтанної кристалізації алмаза;</li> <li>– фізико-механічні властивості матеріалів елементів АВТ;</li> <li>– термомеханічний критерій фазового переходу графіт→алмаз;</li> <li>– алгоритм розв’язування зв’язаних задач методом скінченних елементів.</li> </ul>	5	2	3
<b>Модуль 2</b>			
<b>Змістовний модуль 5. Кристалізація алмазу та кубічного нітриду бору з розплавів при високих тисках</b>			
<p><b>Тема 1.</b> Закономірності кристалізації алмазу у розчинниках з «гетерами» азоту (Івахненко С.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– молекулярно-кінетична теорія росту кристалів, швидкості росту граней;</li> <li>– зональна та секторіальна будова кристалу, піраміди росту граней;</li> <li>– закономірні зростки кристалів; двійники росту та їх види;</li> <li>– механізми та причини змінення форми кристалів в процесі росту;</li> <li>– механізми захвату домішок азоту та бору при розчин-розплавної кристалізації алмазу;</li> <li>– тлумачення використання терміну «гетери»</li> </ul>	5	2	3

для варіювання вмісту азоту в монокристалах алмазу.			
<b>Тема 2.</b> Методи одержання напівпровідникових кристалів алмазу (Івахненко С.О.): – особливості одержання напівпровідникових властивостей алмазу при використанні НТНР-кристалізації та CVD-методів осадження; – введення домішок у розчинник; – використання допованих джерел вуглецю.	5	2	3
<b>Тема 3.</b> Легування монокристалів в процесі вирощування. Метод іонної імплантації (Івахненко С.О.): – легування ростової системи для одержання напівпровідникових алмазів р-типу; – легування ростової системи для одержання напівпровідникових алмазів n-типу; – можливість створення n-p-переходу при вирощуванні кристалів алмазу.	5	2	3
<b>Тема 4.</b> Дослідження морфології граней кристалів алмазу (Івахненко С.О.): – механізми і причини змінення форми кристалів в процесі росту; – реберні та вершинні форми росту кристалів, захват включень; – макроступені та макроспиралі на гранях; – паразитні грані; – пагорби росту.	5	2	3
<b>Тема 5.</b> Властивості легованих кристалів алмазу. Аналіз факторів, що впливають на якість монокристалів алмазу (Івахненко С.О.): – електричні властивості- алмазні провідники, напівпровідники та діелектрики; – механічні властивості та твердість; – оптичні властивості та променепереломлення; – колір кристалів та плеохроїзм; – магнітні властивості.	5	2	3
<b>Змістовний модуль 6. Спінання порошків надтвердих матеріалів під дією високого тиску</b>			
<b>Тема 6, 7.</b> Активація спінання порошків алмазу та кубічного нітриду бору (Бочечка О.О.): – вплив зменшення розміру вихідних алмазних порошків на їхнє ущільнення під дією високого тиску та високої температури;	10	4	6



<ul style="list-style-type: none"> <li>– міграція рідкої фази під час спікання алмазних порошків методом просочування в умовах високих тисків і температур;</li> <li>– взаємодія алмазних порошків і сплавів на основі кобальту за високого тиску і високої температури;</li> <li>– взаємодія Si, WC, і Co з алмазним порошком під час формування алмазного шару на тврдосплавній підкладці;</li> <li>– механізм реакційної взаємодії КНБ з алюмінієм за високого тиску;</li> <li>– еволюція структури композиту із порошку кубічного нітриду бору KM 60/40 та 10% Al на різних етапах спікання;</li> <li>– одержання cBN композитів в системі cBN-Ti;</li> <li>– перколяція CsCl в пори порошу cBN під час спікання;</li> <li>– превентивний характер дії добавки <math>\alpha</math>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> і гетеромодульність компонентів.</li> </ul>			
<p><b>Тема 8.</b> Нанокompозит алмаз-карбід вольфраму та його застосування для робочих елементів в інструментах для чистового точіння та буріння (Бочечка О.О.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– спікання нанопорошків алмазу з добавками тугоплавких металів та їхніх оксидів;</li> <li>– зміна енергії Гіббса внаслідок взаємодії між компонентами під час реакційного спікання композитів алмаз- карбід вольфраму в умовах високого тиску;</li> <li>– формування структури нанокompозиту алмаз – карбід вольфраму;</li> <li>– застосування нанокompозиту алмаз-карбід вольфраму для робочих елементів в інструментах для чистового точіння;</li> <li>– введення крупної алмазної складової в нанокompозит алмаз-карбід вольфраму для його застосування як робочих елементів бурового інструменту.</li> </ul>	5	2	3
<b>Змістовний модуль 7. Апарати високого тиску для синтезу і спікання надтвердих матеріалів</b>			
<p><b>Тема 9.</b> АВТ багатовісного стискання для створення високого тиску і високої температури, у тому числі для синтезу і спікання НТМ (Боримський О.І.):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– класифікація;</li> </ul>	5	2	3

– особливості конструкції; – технічні характеристики.			
<b>Тема 10.</b> Особливості стану АВТ при синтезі і спіканні НТМ (Боримський О.І.): – напружено-деформований стан і поля температури в АВТ різних типів при синтезі і спіканні НТМ; – матеріали для виготовлення найбільш напружених і відповідальних елементів АВТ; – характерні види руйнування АВТ при синтезі і спіканні НТМ.	5	2	3
<b>Тема 11.</b> Практика використання АВТ (Боримський О.І.): – підготовка та проведення експериментів при вимірюванні високого тиску в АВТ з використанням матеріалів-реперів та синтезі алмазу, КНБ і спіканні виробів на їх основі; – техніка безпеки при проведенні робіт при високому тиску і температурі.	5	2	3
<b>Змістовний модуль 8. Моделювання термомеханічного стану елементів апаратів високого тиску</b>			
<b>Тема 12.</b> Комп'ютерне проектування оптимальних схем спорядження комірок АВТ для спонтанного синтезу НТМ (Лещук О.О.): – моделювання полів електропотенціалу, джоулевого тепла, температури в АВТ; – напружено-деформований і граничний стани силових елементів АВТ. Термомеханічний стан АВТ типу «ковадл із заглибленнями» при спонтанній кристалізації алмаза; – аналіз ефективності роботи різних типів АВТ для синтезу алмаза.	5	2	3
<b>Тема 13.</b> Особливості комп'ютерного проектування оптимальних схем спорядження комірок АВТ для вирощування крупних монокристалів алмазу методом температурного градієнта (Лещук О.О.).	5	2	3
<b>Тема 14.</b> Моделювання механічного стану АВТ з алмазними ковадлами (Лещук О.О.): – напружений стан гаскетки; – граничний стан алмазних ковадл; – фазові переходи у зразку хлориду калію.	5	2	3
<b>Тема 15.</b> Моделювання процесів формування кераміки (Лещук О.О.): – оптимізація умов обробки зразків	5	2	3

високотемпературних напівпровідників в АВТ; – оптимізація технологічних параметрів інжекційного формування.			
<b>Разом</b>	150	60	90

### 7. Контроль знань

В основі методів контролю знань використовуються поточне індивідуальне опитування та залік. Залік проводиться на другому році навчання.

Залікове оцінювання виконує кожний викладач, який викладає курс, протягом навчального періоду і при індивідуальному опитуванні після проведення остатнього заняття. Загальне рішення щодо заліку приймає завідувач випускаючої кафедри після отримання рішень від усіх викладачів.

Відповідно до розкладу дата отримання рішення щодо заліку – 20–25.05.21 р.

### Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за навчальну діяльність	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
90–100	+A, A, -A	відмінно
82–89	+B, B, -B	добре
74–81	+C, C, -C	задовільно
64–73	+D, D, -D	
60–63	E	незадовільно з можливістю повторного складання іспиту
35–59	FX	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни
0–34	F	

### 8. Список базової літератури

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение / Под общей ред. Н.В. Новикова. В 6-ти т. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2003–2006.

Т. 1: Синтез алмаза и подобных материалов / Отв. ред. А.А. Шульженко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2003. – 320 с.

2. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1972. – 335 с.\

3. Физические свойства алмаза / Под ред. Н.В. Новикова. Киев: Наук. думка, 1987. 188 с.

4. Синтез алмазов / Н.В. Новиков, Д.Д. Федосеев, А.А. Шульженко, Г.П. Богатырева; под ред. Н. В. Новикова. – К.: Наук. думка, 1987. – 160 с.

5. Поликристаллические материалы на основе алмаза / А.А. Шульженко, В.Г. Гаргин, В.А. Шишкин, А.А. Бочечка. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.

6. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора / А.А. Шульженко, С.А. Божко, А.Н. Соколов и др. – К.: Наук. думка, 1993. – 256 с.

7. Верещагин Л.Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия: Избр. тр. – М: Наука, 1982. – 328 с.

8. Курдюмов А.В., Пилянкевич А.Н. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. – К.: Наук. думка, 1979. – 185 с.
9. Бочечка О.О. Фізико-хімічні основи спікання алмазних порошків під дією високого тиску та високої температури. – К. : Наук. думка, 2019. – 240 с.
10. Никитин Ю.И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1984. – 264 с.
11. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. – М.: Мир, 1979. – 286 с.

ПОГОДЖЕНО  
Завідувач кафедри  
д.т.н., с.н.с.



О.О. Бочечка